

天空光主导的波浪水面下偏振分布模型仿真

褚金奎*, 田连标, 成昊远, 桂心远, 张培奇

大连理工大学辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要 研究了由天空光主导的波浪水面下的偏振分布模式, 验证了在波浪水面下使用偏振导航的可行性, 讨论了不同太阳位置和水面波浪情况对水下偏振分布模式的影响。利用 Cox-Munk 海浪模型描述波浪水面, 建立了考虑大气 Rayleigh 散射、气-水界面折射及水分子单次 Rayleigh 散射的基于 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵的水下偏振传输模型。仿真结果与实测结果的一致性证明了所提模型的正确性。结果表明, 由天空光主导的波浪水面下偏振分布模式是可以预测的, 这主要与太阳位置和水面波浪情况有关。所提模型可以更准确地分析波浪水面下偏振特性, 为水下偏振导航的应用提供了理论依据。

关键词 海洋光学; 偏振; 散射; 波浪

中图分类号 P717

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2001002

Simulation of Polarization Distribution Model Under Wavy Water Surfaces Dominated by Skylight

Chu Jinkui*, Tian Lianbiao, Cheng Haoyuan, Gui Xinyuan, Zhang Peiqi

Liaoning Key Laboratory of Micro/Nano Technology and System, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract We study the polarization distribution model under wavy water surfaces dominated by skylight, verify the feasibility of using polarization navigation under wavy water surfaces, and discuss the influence of different sun positions and wavy water surfaces on the underwater polarization distribution model. The Cox-Munk sea wave model is used to describe the wavy water surface. The underwater polarization propagation model is built on the basis of the Stokes vector and Mueller matrix, which consider the atmospheric Rayleigh scattering, the air-water interface refraction, and the single Rayleigh scattering of water molecules. The consistency between the simulation result and measurement result proves the accuracy of the proposed model. The results show that the wavy underwater polarization distribution model dominated by skylight is predictable, and it is mainly related to the sun position and the wave condition on the water surface. The proposed model can analyze the polarization characteristics of wavy underwater more accurately and provide a theoretical basis for the application of underwater polarization navigation.

Key words oceanic optics; polarization; scattering; waves

OCIS codes 010.4450; 290.5855; 290.5870; 350.7420

1 引 言

海洋探测已成为各发达国家研究的一个重要领域。作为海洋探测的重要工具, 水下航行器(AUV)的导航能力至关重要^[1]。由于水下环境的限制, 目前, AUV 导航定位时普遍使用惯性导航和声学测距。惯性导航误差随时间累积, 导航精度低; 声学测距需在载体上安装水听器, 存在通信时间延迟、传输距离受限等问题。水下载具的导航定位问题需要新

的思路或方式。仿生偏振导航是一项在水下极具应用潜力的新技术^[2], 将其与其他导航方式组合, 将解决目前存在的诸多问题。其中对水下偏振分布模式的准确预测, 是该项技术成功应用的理论前提。

太阳光经过大气散射形成天空光, 再经气-水界面折射和水分子散射等光学过程, 最终在水下形成具有一定规律的偏振分布模式。在阳光能穿透的大部分海洋深处, 偏振分布模式始终保持稳定^[3], 但在不同的时间和地点却是不同的^[4]。在海洋中深度超

收稿日期: 2020-02-20; 修回日期: 2020-04-21; 录用日期: 2020-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(51675076, 51505062)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51621064)

* E-mail: chujk@dlut.edu.cn

过 100 m 时,线偏振度仍然高达 40%^[5],而偏振角的分布则和太阳位置有关^[6]。从水下向上观察时,由于折射效应,水面以上的视野被压缩到一个大约为 97.5° 的锥形区域,这个视野范围就是 Snell 窗^[7]。在平静水面下的偏振分布通常是比较稳定的。Sabbah 等^[8]采用 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵模拟了静态气-水界面折射后的水下偏振分布。Cheng 等^[9]建立了基于水分子单次 Rayleigh 散射的水下偏振分布模型,该模型综合考虑了大气偏振分布、静态气-水界面折射及水下散射三个方面,验证了静态水下偏振导航的可行性。关于静态水面下偏振分布的研究已有很多,而自然水面一般都存在水面波浪,波浪对水下偏振分布的影响是显著的^[10],但是关于波浪水面下偏振分布的研究鲜有报道。

为了更准确有效地预测真实水下偏振分布模式,促进水下偏振导航技术的应用,本文使用 Cox-Munk 海浪模型描述水面波浪,利用 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵,综合考虑大气 Rayleigh 散射、波动水面折射、水分子散射,并建立了波动水面下的偏振传输模型。将仿真结果与实测结果进行比较,在一定程度上验证了模型的正确性。所提模型是一种没有数值计算误差、模型参数可调的解析方法,可为水下目标偏振探测和 水下偏振导航研究提供有效的理论参考。

2 基本原理

主要介绍波动水下偏振传输的数值模型。当一束光从大气进入水下后,会经历大气 Rayleigh 散射、波动气-水界面折射、水下单次 Rayleigh 散射三个光学事件,如图 1 所示。为了仿真波动水下偏振分布图案,Stokes 矢量和 Mueller 矩阵被用来描述这三个光学事件。整个过程中,每一束光都有自己独特的折射与散射的 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵。图 1 中, γ_i 是大气散射角, θ_i 是入射光天顶角, θ_r 是

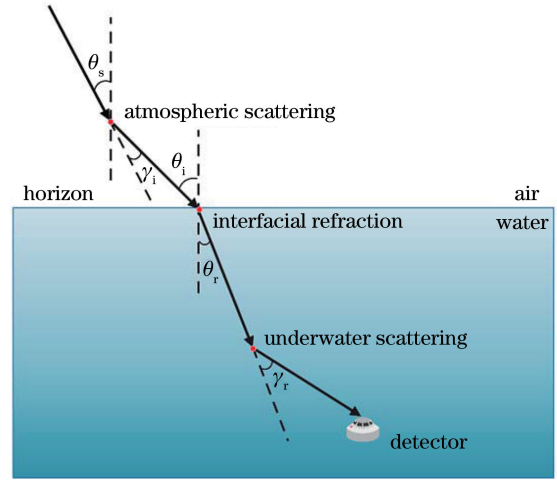


图 1 大气-海洋光学简图

Fig. 1 Sketch of atmosphere-ocean optics

折射光天顶角, γ_r 是水下散射角。

2.1 大气偏振分布

Rayleigh 散射模型是一种简便有效的描述一般大气天空光偏振分布模式的方法。根据 Rayleigh 散射模型,大气天空光的偏振度(DOP)与偏振角(AOP)分别为^[10]

$$P = P_{\max} \frac{\sin^2 \gamma_i}{1 + \cos^2 \gamma_i}, \quad (1)$$

$$\tan \psi = \frac{\sin \theta_i \cos \theta_s - \cos \theta_i \cos(\varphi_i - \varphi_s) \sin \theta_s}{\sin(\varphi_i - \varphi_s) \sin \theta_s}, \quad (2)$$

式中: P 和 ψ 分别为大气偏振度和偏振角; P_{\max} 为天空最大偏振度,这里为 1; θ_s 为太阳天顶角; φ_s 和 φ_i 分别为太阳方位角和观测方位角。 γ_i 的计算公式^[10]为

$$\cos \gamma_i = \sin \theta_i \sin \theta_s + \cos \theta_i \cos \theta_s \cos(\varphi_i - \varphi_s). \quad (3)$$

对于光强 I ,采用 Harrison 等^[11]提出的晴空天窗辐射分布模型:

$$I(\gamma_i, \theta_s, \theta_i) = [A + B \exp(-m\gamma_i) + C \cos^2 \gamma_i \cos \theta_s] \times [1 - \exp(-\beta \sec \theta_i)] \times [1 - \exp(-\tau \sec \theta_s)], \quad (4)$$

式中: β 为回归系数; τ 和 m 分别为大气的光学厚度和质量; $A = 1.63$, $B = 53.7$, $C = 2.04$, $m = 5.49$, $\beta = 1.90$, $\tau = 0.53$ 。光的偏振态可用 Stokes 矢量 $\mathbf{S} = [I, Q, U, V]^T$ 来描述,其中 Q 和 U 分别代表两个方向上的线偏振光, V 代表圆偏振光。对于天空的任意一束光,其 Stokes 矢量可以表达为

$$\mathbf{S} = I \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2\psi \cos 2\epsilon \\ P \sin 2\psi \cos 2\epsilon \\ P \sin 2\epsilon \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: ϵ 为椭球率。天空光主要是线偏振光,椭圆偏振光可以忽略,即 $\epsilon = 0$ 。到达水面的入射光的

Stokes 矢量为

$$\mathbf{S}_i = I \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2\psi \\ P \sin 2\psi \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.2 波动气-水界面折射

当光经过气-水界面时,将发生折射,从而偏振态改变。当水面平静无波时,偏振态的变化可用 Mueller 矩阵表示

$$\mathbf{M}_R = \frac{\sin 2\theta_i / \sin 2\theta_r}{2 \sin^2(\theta_i + \theta_r) / \cos^2(\theta_i - \theta_r)} \times \begin{bmatrix} \cos^2(\theta_i - \theta_r) + 1 & \cos^2(\theta_i - \theta_r) - 1 & 0 & 0 \\ \cos^2(\theta_i - \theta_r) - 1 & \cos^2(\theta_i - \theta_r) + 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\cos(\theta_i - \theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\cos(\theta_i - \theta_r) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: θ_i 和 θ_r 的关系可以表示为 $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$, n_1 和 n_2 分别为空气和水的折射系数。

考虑到真实海面存在波浪,使用经典的 Cox-Munk 海浪模型^[12]对波浪进行描述。如图 2 所示,在该模型中,波浪表面被视为若干个细小面元的集合,每个小面元近似为平面,经过每个小面元折射的光束均严格遵循 Snell 折射定律。在一定水质条件下,每个面元的斜率分布是一个关于风速和风向的函数。根据波浪斜率分布,分别计算天空中各个采样方向的入射光经过水面折射后的 Stokes 矢量,

然后对各方向光束的 Stokes 矢量求加权平均值。其中, φ_r 为这束天空光经过水面折射后的方位角, θ_o 和 φ_o 分别为水下探测器的观测天顶角和方位角。入射光经过波浪面元折射后要被观测到,则须满足

$$\cos(\theta_i - \theta_r) \cos(\varphi_i - \varphi_r) < \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{n_1}{n_2}\right). \quad (8)$$

此时,将 θ_i 和 θ_r 分别投影到 XOZ 和 YOZ 平面,则有

$$\begin{cases} n_1 \sin [\arctan(\cos \varphi_i \tan \theta_i) + \theta_x] = n_2 \sin [\arctan(\cos \varphi_r \tan \theta_r) + \theta_x] \\ n_1 \sin [\arctan(\sin \varphi_i \tan \theta_i) + \theta_y] = n_2 \sin [\arctan(\sin \varphi_r \tan \theta_r) + \theta_y] \end{cases}. \quad (9)$$

波浪面元的斜率可表示为

$$\begin{cases} z_x = \frac{\partial z}{\partial x} = \tan \theta_x \\ z_y = \frac{\partial z}{\partial y} = \tan \theta_y \end{cases}. \quad (10)$$

为了考虑风向的影响,旋转坐标轴使其与风向

匹配,波浪面元的斜率在新坐标系下表示为

$$\begin{cases} z'_x = \cos \varphi_w \cdot z_x + \sin \varphi_w \cdot z_y \\ z'_y = -\sin \varphi_w \cdot z_x + \cos \varphi_w \cdot z_y \end{cases}, \quad (11)$$

式中: φ_w 为风向关于 x 轴正方向的夹角。波浪面元斜率分量为 (z'_x, z'_y) 的概率^[12]为

$$p(z'_x, z'_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2}\right) \times \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{2}C_{21}\eta(\xi^2 - 1) - \frac{1}{6}C_{03}(\eta^3 - 3\eta) + \\ \frac{1}{24}C_{40}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \\ \frac{1}{4}C_{22}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) + \\ \frac{1}{24}C_{04}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: $\xi = z'_x / \sigma_c$, $\eta = z'_y / \sigma_u$, σ_c 和 σ_u 分别为 z'_x 和 z'_y 的方均根值^[12], 分别表示为

$$\begin{cases} \sigma_u = \sqrt{0.003 + 1.92 \times 10^{-3} \omega} \\ \sigma_c = \sqrt{3.16 \times 10^{-3} \omega} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: ω 为水面风速, 单位为 m/s。来自天空中各个采样方向的入射光折射到水下后的 Stokes 矢量可表示为

$$\mathbf{S}_r = \sum [\rho(z'_x, z'_y) \cdot \mathbf{M}_R \cdot \mathbf{S}_i]. \quad (14)$$

2.3 水分子散射

当光线经过折射进入水中后, 由于光与水分子的相互作用而发生散射。在清澈的浅水, 主要发生单次 Rayleigh 散射^[13], Mueller 矩阵^[14]为

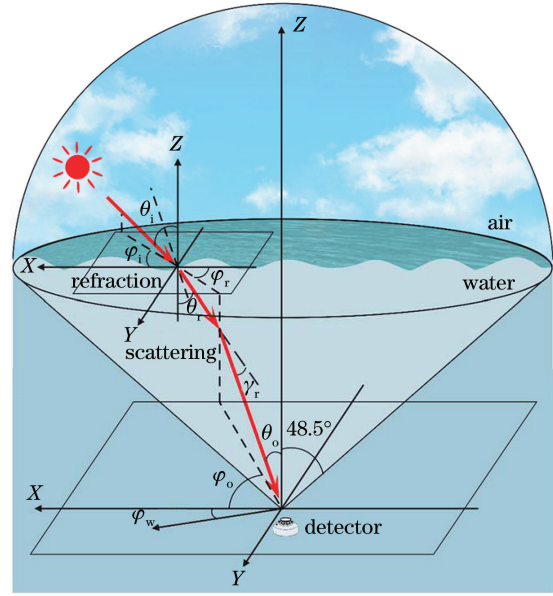


图 2 波浪水面下光学传输过程坐标示意图

Fig. 2 Coordinate sketch of optical transmission process under wavy water surface

$$\mathbf{M}_S = \frac{3(1-\rho)}{4(1+\rho/2)} \times \begin{bmatrix} \frac{1+\rho}{1-\rho} + \cos^2 \gamma_r & -\sin^2 \gamma_r & 0 & 0 \\ -\sin^2 \gamma_r & 1 + \cos^2 \gamma_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \gamma_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2-4\rho}{1-\rho} \cos \gamma_r \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中: ρ 为去偏因子, 取决于引起散射的水分子的各向异性, 在本研究中忽略各向异性, 去偏因子被设为 0。散射后的 Stokes 矢量为

$$\mathbf{S}_o = \begin{bmatrix} I_o \\ Q_o \\ U_o \\ V_o \end{bmatrix} = \sum [\rho(z'_x, z'_y) \cdot \mathbf{M}_{SD} \cdot \mathbf{M}_S \cdot \mathbf{M}_{RS} \cdot \mathbf{M}_R \cdot \mathbf{S}_i], \quad (16)$$

式中: \mathbf{M}_{RS} 和 \mathbf{M}_{SD} 均为旋转矩阵^[15], 分别表示为

$$\mathbf{M}_{RS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\sigma_1 & \sin 2\sigma_1 & 0 \\ 0 & -\sin 2\sigma_1 & \cos 2\sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{M}_{SD} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\sigma_2 & \sin 2\sigma_2 & 0 \\ 0 & -\sin 2\sigma_2 & \cos 2\sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中: σ_1 和 σ_2 均为旋转角度, 与入射方向和散射方向有关。它们分别表示为

$$\cos \sigma_1 = \frac{\cos \theta_o - \cos \theta_r \cos \gamma_r}{\sin \theta_r \sin \gamma_r}, \quad (19)$$

$$\cos \sigma_2 = \frac{\cos \theta_r - \cos \theta_o \cos \gamma_r}{\sin \theta_o \sin \gamma_r}. \quad (20)$$

在此基础上, 求解 Snell 窗内各个方向的偏振度和偏振角, 得到了水下偏振分布模式:

$$P_o = \frac{\sqrt{Q_o^2 + U_o^2}}{I_o}, \quad (21)$$

$$\psi_o = \frac{1}{2} \arctan \frac{U_o}{Q_o}. \quad (22)$$

3 结 果

大气 Rayleigh 散射、波动气-水界面折射及水分子单次 Rayleigh 散射的模型可以描述一般情况下的水下偏振分布。本节分别以不同太阳天顶角、风向和风速等情况对水下偏振分布进行仿真。所有的仿真结果均以水下探测器正向天顶的视角展示,即以仿真图的中心为天顶,越远离中心则观测天顶角越大,最大为约 48.5° 的 Snell 窗边缘,仿真图中心之外的不同方向代表 $0\sim 360^\circ$ 的不同观测方位角,太阳方位角均以 0° 展示,体现在仿真图中的正上方。

3.1 太阳位置

在仿真中,使太阳方位角 φ_s 为 0° ,这样风向与

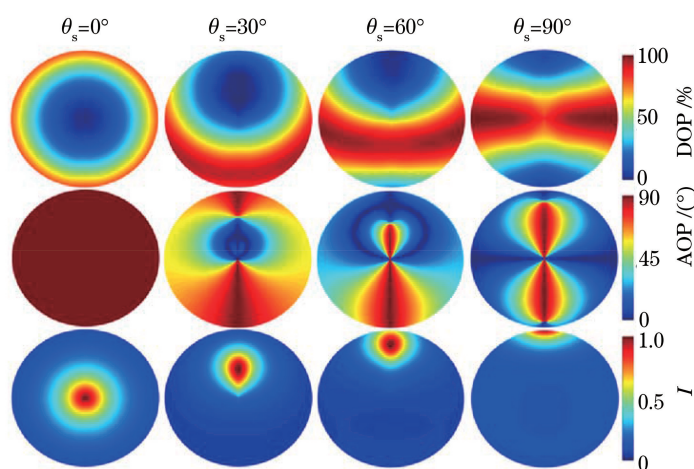


图 3 不同太阳位置下的水下偏振分布仿真

Fig. 3 Simulation of underwater polarization distribution at different sun positions

3.2 风 向

图 4 展示了风速为 5 m/s 时不同风向下的偏振度、偏振角及光强分布。其中,风向 φ_w 分别为 0° , 30° , 60° , 90° 。为更好地分析特征,选择太阳天顶角为 60° 。当风向改变时,分布图案在相应方向发生

太阳方位的夹角即为风向角。图 3 展示了风向为 0° ,风速为 5 m/s 时不同太阳位置下的偏振度、偏振角及光强分布。其中,太阳天顶角分别为 0° , 30° , 60° , 90° 。水下偏振分布高度依赖太阳位置。天空光除了中性点之外是部分偏振的。中性点是一些偏振度为 0,偏振角发生扭曲的点。偏振度以太阳位置为中心,关于太阳子午线对称。随着太阳天顶角的增加,偏振度整体变大。所以,最大偏振度发生在日出与日落。偏振角关于太阳子午线对称。随着太阳天顶角的增加,偏振角发生改变,当太阳天顶角为 30° 和 60° 时,在太阳位置和天顶存在两个中性点。当太阳天顶角为 90° 时,有一个明显的“8”存在于太阳子午线。

明显的改变,这是因为风使得波浪传播方向更多地与风向保持一致,进而影响入射光通过波浪面的折射方向。但总体趋势保持稳定,证明在各种风向条件下,在水下使用偏振导航是可行的。

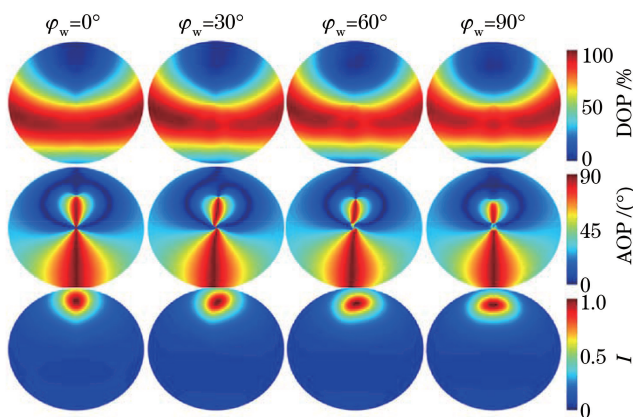


图 4 不同风向下的水下偏振分布仿真

Fig. 4 Simulation of underwater polarization distribution at different wind directions

3.3 风 速

图 5 展示了风向为 0° 时不同风速下的水下偏振分布仿真结果。其中,风速分别为 1, 5, 10, 15 m/s。为更好地分析特征,选择太阳天顶角为 60° 。随着

风速增大,偏振度在一定范围内减小,这是因为当水面波动时,阳光经波浪向多个方向发生折射。与偏振度相比,偏振角则相对比较稳定,“8”字形状有扩大的趋势,且关于太阳子午线对称。

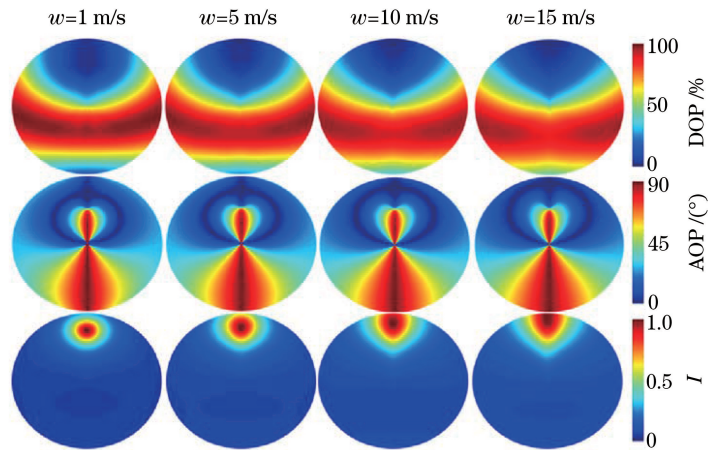


图 5 不同风速下的水下偏振分布仿真

Fig. 5 Simulation of underwater polarization distribution at different wind speeds

4 讨 论

仿真结果与 Bhandari 等^[16] 在圣巴巴拉海峡和夏威夷的水下实测结果一致。为了更好对比,仿真时使用了与实测图一样的图例。实验中,太阳天顶角分别为 $88^\circ, 85^\circ, 77^\circ$;水面平均风速分别为 6, 6, 8 m/s;风向为 0° ;水深约为 5 m。

在偏振度仿真中,图 6(a)和图 6(b)分别为仿真和实测结果,仿真所用的最大偏振度与实验保持一致,分别为 65%, 57%, 53%, 仿真与实测结果中间都发生了凹陷。图 6(c)为太阳主平面内各个观测天顶角方向的偏振度对比,可以看出,仿真与实测结果的最大偏振度位置基本一致,且在该处附近,两者之间的误差也较小。

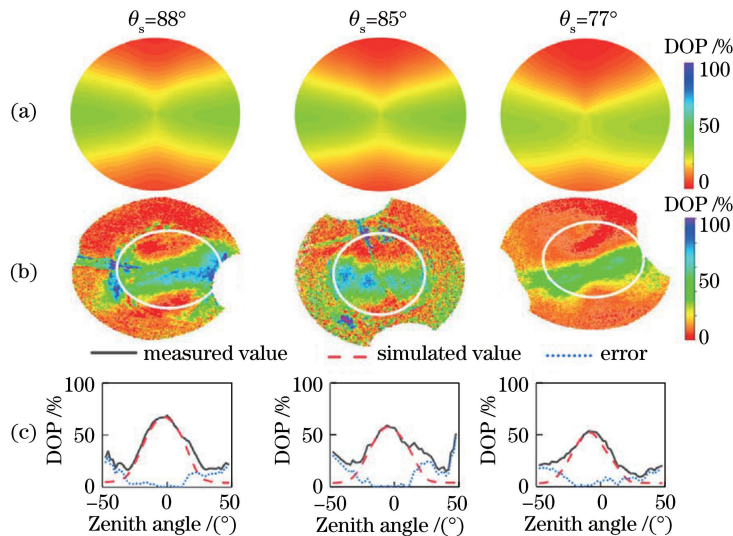


图 6 水下 DOP 分布仿真与实测结果。(a) 仿真结果;(b) 实测结果;(c) DOP 对比

Fig. 6 Simulation results and measurement results of underwater DOP distribution. (a) Simulation result; (b) measurement result; (c) comparison of DOP

在偏振角仿真中,如图 7 所示,仿真与实验结果同样保持了很好的相似性。图 7(c)为水下观测天顶角为 20° 时,观测方位角为 $90^\circ \sim 270^\circ$ 时的偏

振角对比,可以看出,偏振角的仿真结果与实测结果具有很好的一致性,在观测方位角为 90° 时偏振角约为 0° ,且在各个观测方位角处,仿真值与实测

值之间的误差均比较小。相比之下,偏振角分布信息在波浪水面下的稳定性更好,在偏振导航中具有更好的应用。

仿真结果与实测结果在细节上仍然存在差异,这是由于本模型仅考虑水分子引起的 Rayleigh 散射,当水质较差时,由泥砂、藻类及微生物等悬浮物

质所产生的米散射将成为水下散射的主要来源,此时本模型将不能很好地预测水下偏振分布。此外,由于 Cox-Munk 波浪模型本身的局限性,其仅在中等风速下具有较好的模拟效果^[12],因此风速的增大也会导致模型的失效。这种模型用来服务于水下偏振导航时,通过标定,模型的精度可以进一步提高。

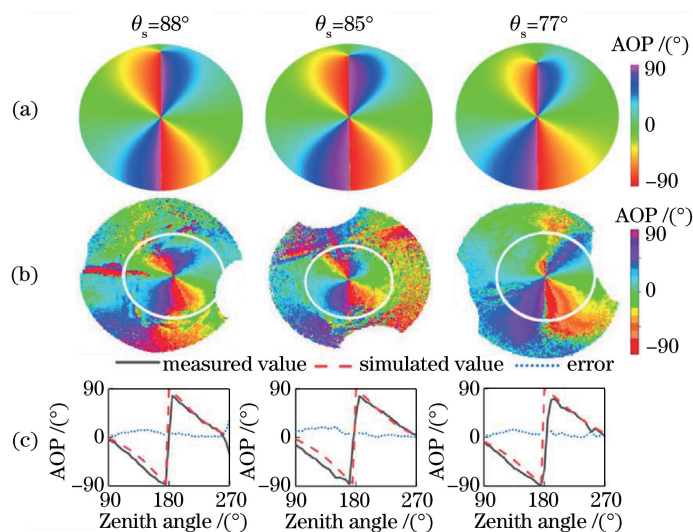


图 7 水下 AOP 分布仿真与实测结果。(a) 仿真结果;(b) 实测结果;(c) AOP 对比

Fig. 7 Simulation results and measurement results of underwater AOP distribution. (a) Simulation result; (b) measurement result; (c) comparison of AOP

5 结 论

本研究在水下偏振传输模型中考虑了水面波浪的影响,使模型预测结果更接近真实情况。基于 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵建立了水下偏振传输模型,得到了阳光经大气 Rayleigh 散射、波动水面折射、水分子散射后的偏振分布模型。通过对模型的仿真结果与实测结果进行比较,验证了所提模型的正确性。仿真结果表明:水下偏振分布在一定条件下是可预测的,它包含了重要的方位信息,可以被水下生物甚至人类利用。在 Snell 窗内,水下偏振分布模式主要与太阳位置有关,同时也受水面波浪的影响,随着水面风速的增大,偏振度在一定范围内减小,偏振角分布扭曲,且与风向有关。所提模型可以准确预测波动水下偏振分布,为水下偏振导航提供理论依据。基于本研究理论,水下航行器可以利用偏振信息获取方位信息,将其与已有的导航手段结合,可进一步提高水下导航精度。

参 考 文 献

- [1] Miller P A, Farrell J A, Zhao Y Y, et al. Autonomous underwater vehicle navigation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(3): 663-678.
- [2] Chu J K, Zhang R, Wang Z W, et al. Progress on bio-inspired polarized skylight navigation sensor[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(23): 2568-2577. 褚金奎, 张然, 王志文, 等. 仿生偏振光导航传感器研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(23): 2568-2577.
- [3] Cronin T W, Marshall J. Patterns and properties of polarized light in air and water [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 2011, 366(1565): 619-626.
- [4] Waterman T H, Westell W E. Quantitative effect of the sun's position on submarine light polarization[J]. Journal of Marine Research, 1956, 15(2): 149-169.
- [5] Ivanoff A, Waterman T H. Factors, mainly depth and wavelength, affecting the degree of underwater light polarization [J]. Journal of Marine Research, 1958, 16: 283-307.
- [6] Cronin T W, Shashar N. The linearly polarized light field in clear, tropical marine waters: spatial and temporal variation of light intensity, degree of polarization and e-vector angle [J]. The Journal of Experimental Biology, 2001, 204(14): 2461-2467.
- [7] Lynch D K. Snell's window in wavy water [J]. Applied Optics, 2015, 54(4): B8-B11.

- [8] Sabbah S, Barta A, Gál J, et al. Experimental and theoretical study of skylight polarization transmitted through Snell's window of a flat water surface [J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2006, 23(8): 1978-1988.
- [9] Cheng H Y, Chu J K, Zhang R, et al. Underwater polarization patterns considering single Rayleigh scattering of water molecules [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(13): 4947-4962.
- [10] Sabbah S, Shashar N. Underwater light polarization and radiance fluctuations induced by surface waves [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(19): 4726-4739.
- [11] Harrison A W, Coombes C A. Angular distribution of clear sky short wavelength radiance [J]. *Solar Energy*, 1988, 40(1): 57-63.
- [12] Cox C S, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [13] Waterman T H. Reviving a neglected celestial underwater polarization compass for aquatic animals [J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2006, 81(1): 111-115.
- [14] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- [15] You Y, Tonizzo A, Gilerson A A, et al. Measurements and simulations of polarization states of underwater light in clear oceanic waters [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(24): 4873-4893.
- [16] Bhandari P, Voss K J, Logan L, et al. The variation of the polarized downwelling radiance distribution with depth in the coastal and clear ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C7): C00H10.